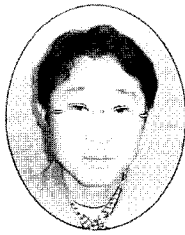


# 국립암센터 양성자동 매스 콘크리트의 온도균열제어

- Prevention of Thermal Cracking for NCC Proton Building -



윤현배\*  
Yoon, Hyun Bae



우영찬\*\*  
Woo, Young Chan



백주현\*\*\*  
Baek, Joo Hyun



이국재\*\*\*\*  
Lee, Guk Jae



이태규\*\*\*\*\*  
Lee, Tae Gyu

## 1. 머리말

최근 구조물의 대형화 및 다기능화 추세에 따라 시공시 이에 부합하는 콘크리트 품질관리가 절실히 필요하게 되었다. 구조물의 대형화로 매시브한 구조물을 시공하는 경우 시멘트 수화열에 따른 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 되어 온도균열이 발생하게 된다. 특히 하단이 구속된 라멘구조, 벽체, 방호벽 및 터널 구조물 등과 같이 외부구속이 큰 철근 콘크리트 구조물에 있어서는 온도균열 및 건조수축 균열의 발생이 두드러져 이에 대한 적절한 대책이 요구된다. 이러한 대책은 설계와 재료 및 시공의 각 분야에 대하여 검토가 필요하며, 최소의 비용으로 최대의 효과를 얻을 수 있도록 실시되어야 한다.

국립암센터 양성자동 구조물의 경우 콘크리트 최대두께가 슬래브는 4.0m, 벽체는 3.0m에 달하며, 1회 타설 시간도 평균 20~30 시간 정도가 소요될 뿐만 아니라 암 치료에 사용되는 방사선 장비 보

관을 위한 차폐 성능까지 요구되기 때문에 일반적인 매스 콘크리트 구조물과는 또 다른 체계화된 방식이 요구된다.

따라서 수화열에 의한 온도균열 및 건조수축 균열을 제어할 수 있는 저발열 콘크리트 배합설계를 실시하여 결합재별 수

화특성을 파악하고, 타설 구획별 수화열 해석을 통하여 온도응력을 예측, 온도균열을 최소화하는 최적의 시공방법을 도출한 후 이에 따른 시공을 실시하고 타설 종료 후 콘크리트의 수화온도 계측으로부터 양생온도의 조절과 양생기간을 해석 결과와

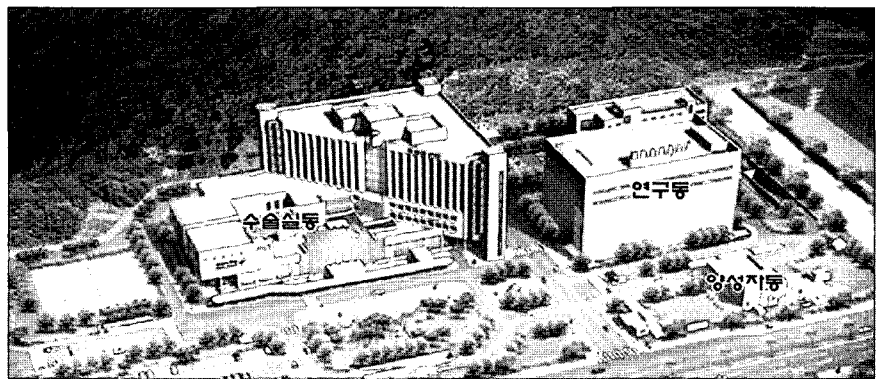


그림 1. 국립 암센터 조감도

표 1. 공사 개요

구분	내용
공사명	국립암센터 시설공사
현장위치	경기도 고양시 일산구 마두1동 809번지 국립암센터
발주처	국립암센터
건축주	보건복지부
공사기간	2003년 3월 3일 ~ 2004년 6월 25일
특기사항	국내 최초의 양성자치료기 도입(현재 11개국 19곳 보유) 암센터 연구동 신축으로 국가 공공보건의료의 확대 및 암유전체 연구 슬래브 두께 최대 4m, 벽체 두께 최대 3m인 매스콘크리트 구축 병원시설 운영과 병행한 철거 및 공사수행

\* 두산중공업(주) 국립암센터 건설현장 공사과장

\*\* 두산중공업(주) 국립암센터 건설현장소장

\*\*\* 정회원, (주)다우건설품질컨설팅 대표이사

\*\*\*\* 우송대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\*\*\*\* 정회원, 우송대학교 토목환경공학과 교수

표 2. 시멘트계 사용재료의 물리·화학적 성질

구분 (O.P.C)	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 Ig. Loss(%)	응결도		안정도 (%)
				초결(min)	종결(hr.:min)	
H사	3.15	3.344	1.30	213	6:25	0.16
S사	3.15	3.310	1.89	251	6:31	0.06
KS L 5201	-	2,800 이상	3.0 이하	60 이상	10:00 이하	0.8 이하

•플라이 애쉬

구분	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 Ig. Loss(%)	이산화규소 (%)	단위수량비 (%)	압축강도비 (%)
H사	2.18	3.749	2.83	60.1	99	91
S사	2.10	3.453	2.30	52.7	100	97
KS L 5405	1.95 이상	2,400 이상	6.0 이하	45 이상	102 이하	60 이상

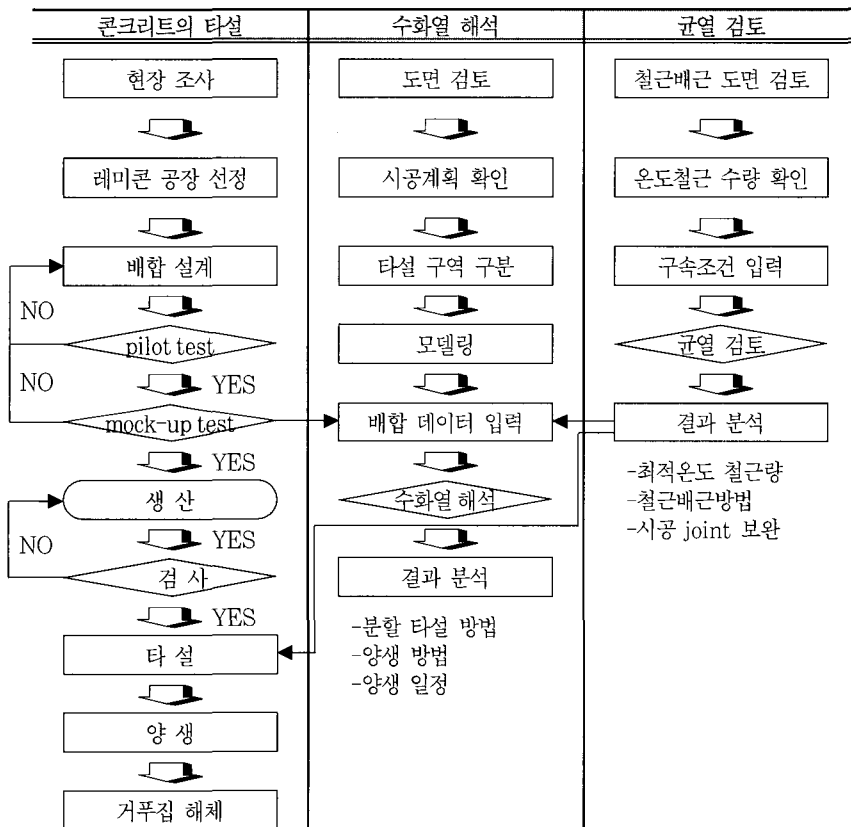
•고로슬래그

구분	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 Ig. Loss(%)	MgO	SO <sub>3</sub>	염화물이온 (%)
P사	2.89	4.280	1.78	3.6	1.6	0.003
KS F 2563	2.86 ~ 2.92	3,800 ~ 4,800	2.80 이하	10 이하	4 이하	0.02 이하

표 3. 골재 사용재료의 물리적 성질

구분	입경 (mm)	조립률 (FM)	비중	흡수율 (%)	씻기손실량 (%)	실질률 (%)	단위중량 (kg/ℓ)
잔골재	A사	5	2.90	2.59	1.14	1.2	-
	B사	5	2.80	2.60	1.10	0.7	-
	KS 품질기준	5	-	2.5 이상	3.0 이하	3.0 이하	-
굵은골재	A사	25	6.85	2.61	0.66	0.3	59.1
	B사	25	6.64	2.63	0.60	0.1	59.6
	KS 품질기준	20	-	2.5 이상	3.0 이하	1.0 이하	-

그림 2. 균열 제어를 위한 현장의 품질관리 체계



의 비교를 통하여 피드백(feed back)을 하는 시공방법 선정 시스템을 구성하여 이에 따른 시공을 실시하였다. 수화열 해석에는 철근배근을 고려하여 구조물의 수화응력을 해석하는 'HeatCon' 프로그램을 적용하였다.

## 2. 콘크리트 배합 선정

현장에서 시공성 및 경제성을 확보하고, 수화열에 의한 균열저감을 위한 배합설계의 방향을 설정하고 이에 따른 사용 결합재의 선정을 위해 시멘트, 플라이 애쉬, 고로슬래그와 저열시멘트의 검토를 수행하였으며 그 중 대표적인 재료의 물리, 화학적 성질은 <표 2> 및 <표 3>에 나타난 바와 같다.

각 재료별로 다양한 시방배합을 통하여 배합특성을 파악한 결과, 현장에서의 시공성 및 생산 공장의 경제성, 수화열에 의한 균열억제를 위하여 최종적으로 플라이 애쉬 분체량에 25%를 치환하는 배합으로 선정하였으며, 그에 따른 시방배합은 <표 4>와 같다.

표 4. 선정된 저발열 콘크리트의 배합표

규격	C	F/A	W	S
25-27-18	266	89	156	839
G	Ad.	Air(%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	
953	3.55	5	27	

## 3. 시공방법 선정 시스템

### 3.1 개요

국립암센터 양성자동의 매스 콘크리트는 수화열에 의한 온도균열 발생여부의 검토가 반드시 필요하며, 온도균열 발생을 저감할 수 있는 최적의 온도균열 저감대책이 수립되어야 한다. 따라서 현장에 적합한 최적의 온도균열 저감공법 선정을 위하여 콘크리트의 수화온도를 예측하고, 시간 단계별 온도응력을 해석함으로써 콘크리트 타설시 최적의 온도균열 저감방안을 수립하는 사전관리 체계 및 품질관리 체계가

필요하다. <그림 2>는 매스 콘크리트에 발생 가능한 균열의 제어를 위한 현장에서의 품질관리 체계로써, 설계조건, 레미콘의 배합 및 생산, 타설에 이르는 자료들을 데이터베이스화하여 이를 수화열 해석에 적용, 콘크리트의 시공방법 및 양생방법, 철근의 배근에 이르는 일련의 과정에 적용할 수 있도록 시스템화 하였다.

### 3.2 온도균열 저감방안

매스 콘크리트의 품질관리에서 가장 강조되는 부분은 수화열에 의한 온도균열 문제로 구조물이 외부구속 될 경우 그 폭이 크고 구조물을 관통시킴으로써 구조물의 내력 및 내구성, 수밀성 등을 저하시켜 구조물에 치명적인 손상을 입힌다. 이에 대한 대처방안으로 저발열 콘크리트의 사용과 양생시 파이프 쿨링에 의한 내부온도 저감 공법이 대표적인 온도균열 제어공법으로 되어있으며, 최근에는 저열 시멘트를 사용함으로써 온도균열을 저감시키는 방법 등이 사용되고 있다. 또한, 단열거푸집의 이용이나 내외부의 온도차를 줄여주기 위해 동절기 시공시 콘크리트 외부의 온도를 올려줌으로서 내외부의 온도차를 저감시키는 방법도 시공성 및 경제성을 고려하여 많이 사용되고 있다.

콘크리트의 배합설계 검토결과 당 현장의 콘크리트는 폴리칼슘산계 고성능 혼화제와 플라이 애쉬를 사용한 저발열 배합설계로 결정하였으며, 배합조건 이외에 고려할 수 있는 온도균열 저감공법으로는 외기온도 상승시 재료의 프리쿨링과 쿨러의 사용, 시공성을 고려한 수직분할 타설과 양생시 내외부 온도차의 저감을 위한 외부 가열공법을 선정하였다. 또한 철근의 배근간격이 균열을 제어하기에 효과적으로 배근되었는지를 해석시 검토하고 이를 조정키로 하였다.

### 3.3 해석 조건

국립암센터 양성자동 매스 콘크리트 중 에서 Gantry Room의 지하 중 3층 일부 부에 대하여 정리를 하면 다음과 같다. 검

토 대상 구조물은 <그림 3>의 타설 현황과 같이 계속적으로 연결되는 형태로 구성되어 있기 때문에 대칭성을 고려하여 <그림 4>와 같이 모델링을 설정하였다. 1회 타설량은 약 4,000 m<sup>3</sup>이고, 타설 높이는 내부 3.83 m, 외부 2.5 m이며, 중앙부 벽체의 두께는 2.15 m이고, 철근은 초기 균열 제어를 위한 철근 간격 해석결과에 의해 HD25@125로 배근되었다.

콘크리트 타설 온도는 타설 시기의 레미콘 공장 조건을 고려하여 8°C로 가정하였으며, 외기대류계수는 측면의 거푸집에서 6.0 kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C, 상면의 양생매트 2겹 사용의 경우 5.0 kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C로 가정하였다.

해석에 사용된 콘크리트의 기본적인 물성치는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 압축강도 : 27 MPa

- 2) 사용시멘트 : 1종 포틀랜드 시멘트 + 플라이 애쉬
- 3) 콘크리트 단위중량 : 2,500 kgf/m<sup>3</sup>
- 4) 콘크리트의 열팽창계수 :  
 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
- 5) 콘크리트의 열전도율 :  
2.15 ~ 1.62 kcal/m·hr·°C  
(재령에 따라 변화됨)
- 6) 콘크리트 비열 :  
0.249 ~ 0.216 kcal/kg·°C  
(재령에 따라 변화됨)

### 3.4 양생방법 선정

대상 구조는 동절기에 타설되는 매스 콘크리트이기 때문에 일반적인 양생조건으로 양생하게 되면 내외부의 극심한 온도차이로 인하여 온도균열의 발생이 예상되는 구조이

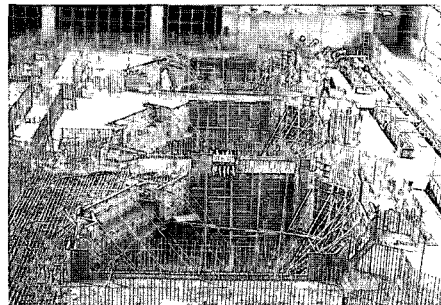


그림 3. 콘크리트 타설 현황

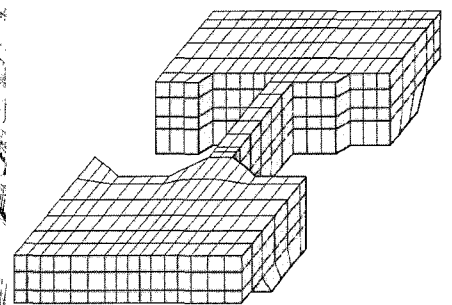


그림 4. 해석 대상 부재의 타설부 모델링

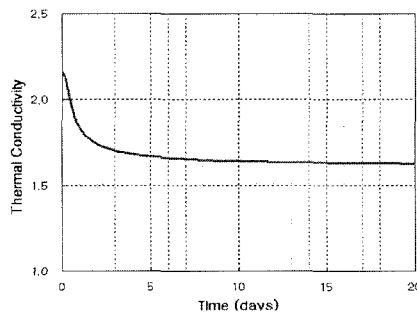


그림 5. 콘크리트 열전도율

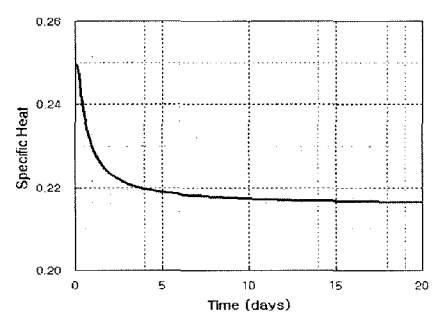


그림 6. 콘크리트 비열

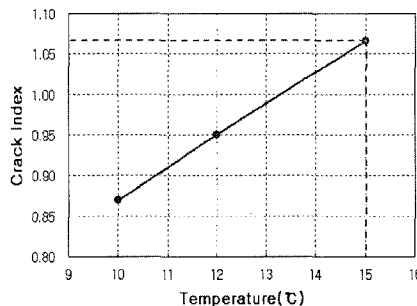


그림 7. 가열온도에 따른 균열지수

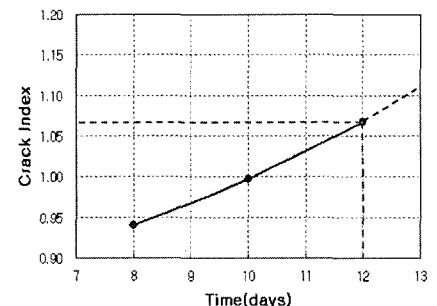


그림 8. 가열 해제시기에 따른 균열지수

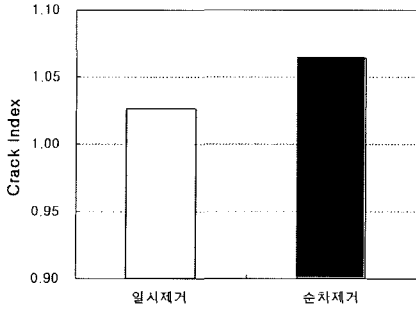


그림 9. 양생포 제거방식에 따른 균열지수

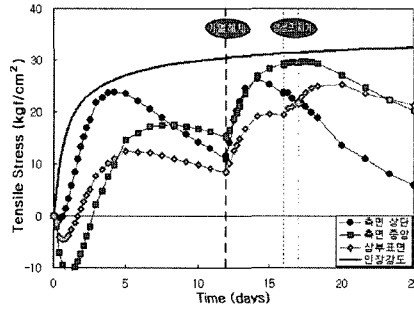


그림 10. 시간에 따른 최대응력의 변화

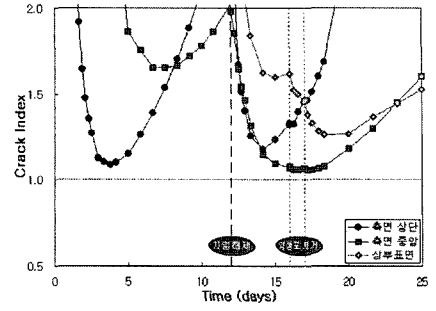


그림 11. 시간에 따른 균열지수의 변화

다. 따라서 현장에 적합한 온도균열 저감공법을 위하여 가열온도 및 기간, 그리고 양생포 제거일시 및 방법에 대하여 비교·분석하여 최적의 양생방법을 선정하였다.

### 3.4.1 가열온도 및 기간 선정

가열 양생온도를 10°C, 12°C 및 15°C로 각각 선정하였을 경우 가열온도에 대한 최대 균열지수는 <그림 7>과 같으며, 가열 해제 시기를 8, 10, 12일로 각각 선정하였을 때의 결과는 <그림 8>과 같다.

최소한의 시공 안전성을 확보하기 위해서는 시방서에 기재되어 있는 유해한 균열 발생을 제한할 경우의 균열지수인 0.7이상 1.2 미만 일 때가 타당하다고 판단되며, 이 해석에서는 균열지수 1.0 이상인 경우에 해당하는 가열온도 15°C로 12일 후에 가열해제를 하는 것으로 가열 양생조건을 선정하였다.

### 3.4.2 양생포 제거일시 및 방법 선정

타설 12일후 가열 조건을 해제하고 콘크리트를 바로 대기 중에 노출시키면 온도 충격(급작스러운 온도변화로 인하여 발생하는 응력 집중현상)이 발생할 가능성이 매우 크다. 따라서 일정기간 양생포가 존치된 상태로 유지하여 급작스러운 온도변화를 방지하여야 하며, 양생포 제거 시에도 일시에 제거하는 방법과 순차적으로 1점씩 제거하는 방법에 대한 검토를 수행하여 최적의 조건을 결정하여야 한다.

<그림 9>에서 보는 바와 같이 일시 제거 시에는 균열지수 1.03, 순차제거 시에는 균열지수 1.06으로 커다란 차이는 없지만 순차 제거가 다소간의 여유를 더 가지

는 것으로 나타나고 있어 16일째(가열해제로부터 4일후)부터 1일에 1점씩 순차적으로 양생포를 제거하는 것으로 선정하였다.

### 3.4.3 수화열에 의한 응력 해석 결과

위와 같이 선정한 양생방법에 따라 온도응력 및 균열지수를 평가하면 <그림 10> 및 <그림 11>과 같이 나타나 해석적으로는 모든 위치에서 균열이 발생하지 않는 것으로 평가된다. 그러나 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 유해한 균열 발생을 제한할 수준인 균열지수 0.7~1.2 사이에 존재하고 있어, 현장여건 및 외기 온도변화 등 실제 콘크리트 타설 및 양생시 콘크리트 상면 및 측면 부위에서 미세한 표면균열이 발생할 가능성이 있기 때문에 시공시 세심한 주의관찰이 요구된다.

## 4. 현장타설 및 계측검토

### 4.1 계측기 설치

국립암센터 양성자동 지하 중3층 하단부의 저발열 콘크리트 타설시 해석결과와의 비교를 위하여 <그림 12>와 같이 콘크리트 타설 부위의 상단부와 중심부 위치에 센서를 각각 설치하였으며, 또한 Gantry

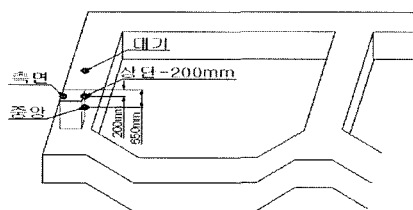


그림 12. 수화열 온도측정 센서 위치도 (지하 중3층 하단부)

부의 수화열 해석결과와의 검토를 위하여 <그림 13>과 같이 수화열 측정용 센서를 설치하여 양생 중 수화열 및 대기온도에 대한 현장 계측을 실시하였다.

### 4.2 지하 중3층 하단부의 계측 및 외관조사 결과

온도 계측기를 이용하여 타설후 10일간의 온도 변화를 측정하여 얻은 결과를 살펴 보면, 중앙부에서의 최대온도는 타설후 2.6일에서 40.5°C가 발생하며, 상단-200 위치에서의 최대온도는 타설후 3.0일에서 35.7°C 그리고, 측면 위치에서의 최대온도는 타설후 3.0일에서 21.6°C가 발생하는 것으로 나타나고 있다. 그리고 측면 위치에 설치된 계측기의 온도 변화는 중앙부 및 상단-200에서의 온도 값과는 다른 경향을 나타내고 있는데, 이는 측면 센서의 위치가 거푸집과 직접 접해 있어 대기 온도변화의 영향과 콘크리트 내부온도 변화의 영향이 결합되어 나타나는 것으로 판단된다.

<그림 14>에서 보는 바와 같이 계측된 결과를 해석치와 비교하여 보면, 상단-200에서의 해석치는 계측치와 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 중앙부에서는 최대온도 도달 시까지는 해석치와 계측치가

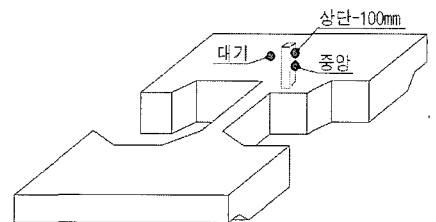


그림 13. 수화열 온도측정 센서 위치도 (지하 중3층 Gantry부)

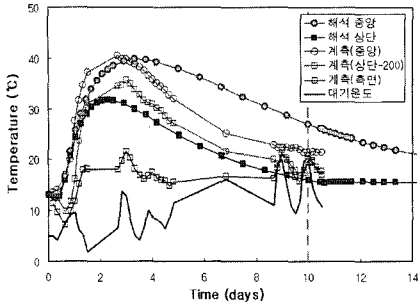


그림 14. 지하 중3층 하단부 계측결과와의 비교

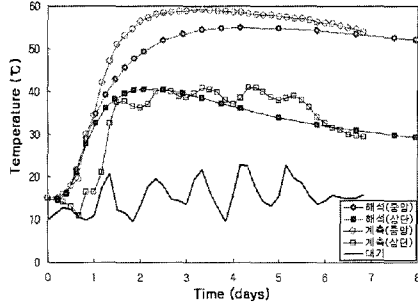


그림 15. 지하 중3층 Gantry부 계측결과와의 비교

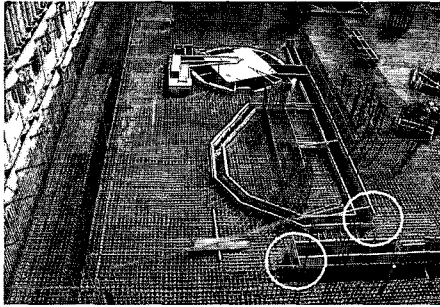
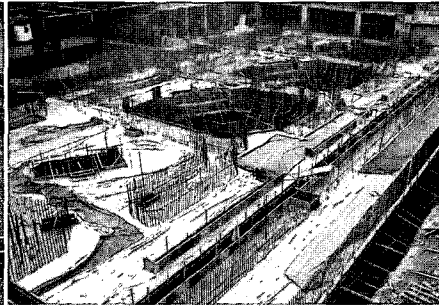


그림 9. 우각부의 철근보강 및 양생 전경



거의 유사한 값을 보이고 있지만 최대온도 이후에 해석치에 비하여 계측치가 빠르게 감소되고 있는 것으로 나타났는데, 이는 부재의 타설 높이가 1.3m인 비교적 낮은 높이이고 대기와 접하는 면적이 비교적 넓어 최대온도 도달 후 내부 발열량이 외부로 빠르게 발산되는 것이 원인인 것으로 판단된다.

거푸집 제거 후 콘크리트 표면에서의 균열에 대한 외관조사 결과, 온도균열 및 건조수축에 의한 균열이 전혀 발견되지 않아 본 시스템을 이용한 구조물의 타설 관리 방법이 적절한 것으로 판단된다.

#### 4.3 지하 중3층 Gantry부의 계측 및 외관 조사 결과

현장 타설에 의하여 계측된 결과를 사전 해석 결과와 비교하여 보면 <그림 15>와 같으며, 이 계측 결과가 4,000 m<sup>3</sup>의 물량을 약 30시간에 걸쳐 타설할 결과임을 감안한다면 사전 해석은 구조물의 실제 온도 발생 이력을 거의 그대로 예측하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 상단 위치의 경우 해석에서는 외기 온도 변화를 예측할 수 없어 평균값으로 입력하였기 때문에 균

일한 곡선의 형태로 나타나지만 실제 계측의 경우에는 대기온도의 변화에 따른 영향이 반영되어 부분적인 증감이 반복되어 나타나고 있다.

또한 거푸집 제거 후 균열에 대한 외관조사 결과, 온도균열은 물론 건조수축 균열도 거의 발생하지 않은 것으로 조사되어 현장에 적용된 매스 콘크리트 균열저감 방법에 의한 구조물 타설은 실제 현장에서의 적용성이 매우 뛰어난 것으로 판단된다.

### 5. 맺음말

국립암센터 양성자동의 매스 콘크리트는 사용 목적에 부합하며 경제적인 콘크리트의 배합 선정과 시공방법 선정 시스템에 의한 구체적인 양생방법 및 일정으로 실제 구조물을 타설 관리하고 계측을 수행하였다. 구조물의 중앙부와 표면부에서의 온도에 대한 실제 계측치와 시스템에 의한 사전 해석치는 거의 동일하게 나타나고 있는 것으로 조사되어 사전 해석은 실제 구조물의 거동을 그대로 모사하여 예측하는 것으로 확인되었으며, 제안된 콘크리트 배합설계와 해석 결과에 따른 시공방법은 수화열에 의한 균열이 대부분 제어되는 것으로

입증되었다. 국내 건설시장을 보면 본고에서 언급된 국립암센터 현장 이외에도 매스 콘크리트 구조물의 시공이 많이 이루어지고 있다. 이와 같은 매스 콘크리트의 경우 구조물의 균열은 거의 필연적 현상이며 특히 매스 콘크리트 구조물은 시멘트의 수화열에 의해 온도균열 발생 확률이 매우 높고, 이러한 온도균열은 구조물의 내구성 저하의 주요 요인으로 작용하게 된다. 따라서 온도균열 억제를 위한 콘크리트 배합설계 검토 및 콘크리트 타설전 시공(양생) 방법에 대한 검토를 수행하여 온도균열을 최대한 방지할 수 있는 방안을 모색하는 과정이 필수적이라고 할 수 있다. □

### 참고문헌

1. "콘크리트표준시방서", 한국콘크리트학회.
2. 김진근 등 5인, "시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 제3호, 1995.
3. 김진근, 이태규 등 9인, "콘크리트 구조물에서의 수화열 저감방안 연구", 한국전력연구원, 1999.
4. 이태규, "차폐 콘크리트 구조물의 수화열 및 수축현상을 고려한 초기재령거동 해석", 다우건설품질컨설팅, 2004.
5. 이태규, "HeatCon", 소프트웨어 등록번호 2002-01-12-5150, 2002.
6. 이태규, "매스콘크리트 양생일정 선정 프로그램", 소프트웨어 등록번호 2004-01-12-249, 2004.
7. 이태규, 백주현, "콘크리트 양생방법 선정장치 및 이를 적용한 선정방법", 특허출원번호 10-2004-0012695, 2004.
8. ACI Committee 207.1R-96, "Mass Concrete," ACI Manual of Concrete Practice, 1999.
9. Carino, N.J., Lew, H.S., and Volz, C.K., "Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Method," ACI Journal, V.80, No.10, 1983.
10. 日本コンクリート工學協會, "マスコンクリートの溫度應力研究委員會報告書", 1985.
11. 日本土木學會, "最新のマスコンクリート技術-14", 콘크리트技術シリーズ, 1996.